



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

MODELOVÁNÍ A ANALÝZA ENERGETICKY ÚSPORNÝCH BUDOV

MODELLING AND ANALYSIS OF ENERGY-AWARE BUILDINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MATEJ DEVEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. STRNADEL JOSEF, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Devečka Matej**

Obor: Informační technologie

Téma: **Modelování a analýza energeticky úsporných budov**
Modelling and Analysis of Energy-Aware Buildings

Kategorie: Modelování a simulace

Pokyny:

1. Proveďte rozbor a popis provozu budov a jejich vnějšího a vnitřního prostředí (zejm. vytápění, chlazení, větrání) včetně potřeby a spotřeby energie související s provozem.
2. Po dohodě s vedoucím zvolte vhodné prostředky pro modelování systémů a analýzu jejich vlastností.
3. Pomocí prostředků zvolených v předchozím bodě vytvořte model vnějšího a vnitřního prostředí zvolené budovy použitelný k analýze vlivu okolí a řízení procesů v budově na energetickou, popř. také ekonomickou, náročnost provozu budovy.
4. Funkčnost modelu demonstруйте pro několik vhodně zvolených případů vnějšího a vnitřního prostředí budovy.
5. Diskutujte a zhodnoťte možnosti vytvořeného modelu z hlediska sledování dějů a analýzy vlivů zmíněných v bodu 3 a zobecnění modelu a navrhněte možné směry pokračování v projektu.

Literatura:

- Dle pokynů vedoucího.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Splnění bodů 1 a 2 zadání, vytvoření základního modelu prostředí.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Strnadel Josef, Ing., Ph.D., UPSY FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta informačních technologií

Ústav počítačových systémů a sítí

602 00 Brno, Božetěchova 2



prof. Ing. Lukáš Sekanina, Ph.D.
vedoucí ústavu

Abstrakt

Práca sa zaoberá analýzou prostredia, návrhom modelu energeticky úspornej budovy, jeho implementáciou a testovaním. Analyzuje jednotlivé faktory, ktoré majú vplyv na energetickú náročnosť budov. Predstavuje návrh modelu, ktorý umožňuje sledovanie spotreby energie v budove a simuláciu tepelných javov. Návrh modelu je implementovaný v nástroji UPPAAL SMC, za pomoci siete stochastických časovaných automatov. V poslednej časti práca obsahuje vyhodnotenie jednotlivých testov a ich porovnanie s predpokladmi.

Abstract

This thesis is focused on environment analysis, design, implementation and testing the energy-aware building model. It breaks down individual factors affecting energetic perspective of building. It introduces design of model that allows monitoring of energy consumption and simulation of heat transfers. Implementation uses stochastic timed automata in UPPAAL SMC environment. The last part of thesis contains tests showing model functionality.

Klíčová slova

energeticky úsporné budovy, model budovy, energetický model, matematický model, analýza, spotreba energie, uppaal

Keywords

energy-aware buildings, model of building, energetic model, mathematical model, analysis, energy consumption, uppaal

Citace

DEVEČKA, Matej. *Modelování a analýza energeticky úsporných budov*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Josef Strnadel, Ph.D.

Modelování a analýza energeticky úsporných budov

Prohlášení

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Josef Strnadela, Ph.D.. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Matej Devečka
16. května 2018

Poděkování

Touto cestou by som chcel poďakovať pánovi Ing. Josef Strnadelovi, Ph.D., za pomoc, vedenie a odborné pripomienky pri vypracovaní mojej bakalárskej práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Prostredie	4
2.1	Rozdelenie prostredia	4
2.2	Teplota vzduchu	4
2.3	Horizontálne prúdenie vzduchu	5
2.4	Vlhkosť vzduchu	5
2.5	Vlastnosti vzduchu v interiéri	5
2.6	Vlastnosti stien	6
2.7	Technické parametre stien	6
2.8	Technické parametre podlahy a stropu	8
2.9	Tepelné mosty	8
2.10	Vykurovanie	9
2.11	Vykurovanie plynom	9
2.12	Vykurovanie elektrickou energiou	10
2.13	Tepelné čerpadlo	10
2.14	Chladenie	10
2.15	Vetranie	11
2.16	Vplyv jednotlivých spôsobov na životné prostredie	11
3	Návrh modelu	12
3.1	Kyberfyzikálny systém	12
3.2	Vonkajšie prostredie	12
3.3	Model počasia s dennou teplotou	12
3.4	Model počasia s polynomiálnou funkciou	13
3.5	Model pre teploty počas dňa	13
3.6	Prúdenie vzduchu	14
3.7	Slnéčné žiarenie	14
3.8	Modelované vlastnosti budovy	14
3.9	Modelový čas	15
3.10	Usporiadanie miestností	15
3.11	Obvodové steny	15
3.12	Vykurovanie	16
3.13	Tepelná kapacita miestnosti	16
3.14	Teplota miestnosti	17
3.15	Používateľ	18
3.16	Kontrolér	18

4	Implementácia modelu	19
4.1	UPPAAL SMC	19
4.2	Model	19
4.3	Miestnosť	19
4.4	Užívateľ	20
4.5	Kontrolér	20
4.6	Vonkajšie prostredie	21
4.7	Ohrievač	21
4.8	Chladenie	22
4.9	Spotreba energie	22
4.10	Čas nekomfortu	22
4.11	Denný režim	22
5	Testovanie modelu	24
5.1	Metodológia	24
5.2	Jednotné parametre	24
5.3	Parametre testovaného Modelu 1	24
5.4	Rozmery miestností a materiály	24
5.5	Parametre ohrievačov	26
5.6	Parametre testovaného modelu číslo 2	26
5.7	Parametre testovaného Modelu číslo 3	27
5.8	Testovanie spotreby energie na základe izolácie domu	27
5.9	Výsledky testu	27
5.10	Testovanie doby nekomfortu na základe výkonu ohrievača a klimatizačnej jednotky	27
5.11	Výsledok testu	28
5.12	Testovanie modelu pre ročné teploty	29
5.13	Výsledok testu	29
5.14	Testovanie modelu bez klimatizačných jednotiek	29
5.15	Výsledok testu	30
6	Záver	31
	Literatura	32

Kapitola 1

Úvod

Úspora energie v akejkolvek forme je v dnešnej dobe témou, ktorou sa spoločnosť do značnej miery zaoberá. Na spotrebu energie sa dá z pohľadu používateľa technológií nahliadnuť z dvoch stránok. Prvá stránka je ekonomická a už od prvého momentu je zrejmé, že s rastúcou spotrebou energie z akákoľvek zdroja stúpa aj celková cena za túto energiu. Druhou stránkou je stránka ekologická. Väčšina dnešných zdrojov energie vytvára rôzne látky, ktoré sú viac, či menej považované ako škodlivé a nevhodné pre životné prostredie na Zemi.

Keď sa zameriame na cenu za jednotku energie, zistíme, že energia z ekologicky nezávadných alebo nízko ekologicky závadných zdrojov je drahšia ako tá z ekologicky závadných zdrojov. Znížením absolútnej spotreby však vždy znížime absolútny dopad na životné prostredie a absolútnu cenu. Znížením energetickej náročnosti budovy teda zlepšíme aj ekonomickú aj ekologickú stránku.

Pri energií, ktorú využíva obývateľná budova je najväčšiou položkou energia spotrebovaná na udržiavanie teploty. Znížiť túto energiu je možné jednak znížením náročnosti na teplotné podmienky vo vnútri budovy a druhak zlepšením teploizolačných vlastností stien.

Nie vždy je však jednoduché, určiť aké materiály je treba použiť aby sa docielila požadovaná spotreba energie. Niekedy sú náklady na zlepšenie izolačných vlastností väčšie ako niekoľkoročné ušetrené náklady za energiu. Je treba preto zvoliť kompromis spotreby energie a ceny materiálov. Metóda pokus omyl je pri stavbách nákladná, ba až neprípustná a tak prichádzajú na rad modely budov.

Model budovy, ktorý má táto práca za cieľ navrhnuť, implementovať a otestovať je založený na analýze počasia, fyzikálnych vlastností materiálov a energetických zmien v čase. Analýza sa snaží zistiť, ktoré faktory majú na spotrebu energie vplyv. Nie je však možné namodelovať všetky fyzikálne javy a je potrebné vybrať tie, čo najmarkantnejšie ovplyvňujú energetické správanie budovy.

Výsledkom výberu týchto faktorov a snahy nájsť pre ne vhodné matematické vyjadrenia je návrh modelu. Je dôležité aby okrem faktorov zohľadnených v návrhu boli spomenuté aj faktory, ktoré model nazáhrňa a mohli by spôsobiť odchýlky. Návrh modelu sa opiera o fakt, že je založený na matematických a fyzikálnych zákonitostiach.

Výsledným produktom po navrhnutí modelu je jeho implementácia, ktorú je možné testovať, meniť v nej technické parametre alebo parametre prostredia. Takto implementovaný model slúži ako nástroj na vyskúšanie konkrétnych riešení na konkrétnej stavbe alebo jej časti.

Kapitola 2

Prostredie

2.1 Rozdelenie prostredia

Prostredie uvažovanej budovy rozdeľujeme podľa obvodových stien na vnútorné a vonkajšie. Vnútorné prostredie tvoria jednotlivé miestnosti a vnútorné priečky a nachádza sa v ňom technické vybavenie budovy. Vnútorné prostredie dokážeme kontrolovať a zasahovať doň pomocou technického vybavenia.

Vonkajšie prostredie je ovplyvňované hlavne počasím, geografickou polohou a dátumom roku. Z fyzikálneho hľadiska pôsobí aj budova a jej technické vybavenie na vonkajšie prostredie ale tento vplyv je zanedbateľný.

2.2 Teplota vzduchu

Teplota vonkajšieho prostredia je teplota vzduchu, meraná 2m nad povrchom, napríklad teplomerom meteorologickej stanice. Časové zmeny teploty vonkajšieho prostredia sú približne periodické s periódou jeden deň a s periódou jeden rok. Priebeh teplôt vzduchu počas jedného dňa budeme ďalej nazývať denný chod teploty vzduchu a priebeh teplôt počas jedného roku ročný chod teploty vzduchu.

Denný chod teploty vzduchu má svoje minimum a maximum, ktorých hodnota je závislá na zemepisnej polohe, nadmorskej výške, charaktere počasia a aktuálnej polohe v ročnom chode teploty vzduchu. Čas, kedy teplota dosiahne maximum alebo minimum závisí od času východu slnka a času západu slnka. Maximum dosahuje teplota vzduchu na intervale niekoľko hodín okolo poludnia a minimum dosahuje na intervale medzi nultou hodinou a východom slnka.

Ročný chod teploty vzduchu môžeme rozdeliť na štyri typy. Rovníkový typ má malé teplotné rozdiely, 1°C až 5°C . Maximá nastávajú počas rovnodennosti a minimá počas slnovratu. V tropickom type teplotné rozdiely rastú spolu so vzdialenosťou od pobrežia, 5°C - 15°C . Typ mierneho prostredia je charakteristický zmenou ročných období. Rozdiely teploty v prímorských oblastiach sú menšie, 10°C - 15°C , vo vnútrozemí dosahujú až 60°C . Pri polárnom type sa takmer stráca periodicitá počas dvadsaťštyrihodinového dňa a ostáva len ročná. Maximálne teploty nastávajú počas vrcholenia polárneho dňa a minimálne ku koncu polárnej noci. Rozdiely dosahujú 20°C - 40°C .

Vplyv na teplotu vzduchu majú viaceré faktory ale pri analýze budeme vychádzať z historicky nameraných hodnôt teploty, ktoré už tieto faktory zahŕňajú a teplotu vonkajšieho prostredia zabalíme do funkcie času (dátumu). [7]

2.3 Horizontálne prúdenie vzduchu

Horizontálne prúdenie vzduchu, vietor, je ďalším znakom vonkajšieho prostredia. Tento atmosférický jav je dôsledkom rozdielu tlakov medzi masami vzduchu a pôsobením Coriolisovej sily, spôsobenej otáčaním zeme. Charakterizuje ho smer prúdenia a rýchlosť prúdenia. Prúdenie vzduchu má vplyv na tepelné vlastnosti materiálov. Prúdiaci vzduch pri kontakte s povrchom odvádza teplo rýchlejšie ako vzduch statický. Tieto vlastnosti sa menia so smerom prúdenia a jeho rýchlosťou. [7]

2.4 Vlhkosť vzduchu

Vlhkosť vzduchu je miera obsahu vody vo forme vodných pár vo vzduchu a taktiež ovplyvňuje tepelné vlastnosti materiálov a samotného . S rastúcou vlhkosťou, sa zvyšuje schopnosť majority materiálov viesť tepelnú energiu, keďže voda ju vedie pomerne dobre. Tieto hodnoty sa dajú zisťovať experimentálne pre konkrétny materiál, jeho hrúbku, tvar a veľkosť povrchu.

2.5 Vlastnosti vzduchu v interiéri

Teplota vzduchu v interiéri je závislá na tepelnej energii a energií žiarenia, dodanej alebo odobratej z vonkajšieho prostredia, stien priliehajúcich miestností, vykurovaním a chladením. Je to veličina, ktorej hodnota po zmeraní ovplyvňuje chovanie vykurovania a chladenia a je na nej závislý komfort používateľa. Vo všeobecnosti môžeme teplotu chápať ako prejav miery energie v miestnosti. Túto energiu nazývame inak aj teplo a to, ako sa prejaví na hodnote teploty, závisí na tepelnej kapacite vzduchu a iných objektov v miestnosti.

Horizontálne prúdenie vzduchu je v interiéri minimálne a nastáva len pri situáciách ako je otvorenie okna alebo dverí a končí po vyrovnaní tlakov v interiéri a exteriéri alebo medzi jednotlivými miestnosťami interieru. Smer tohoto prúdenia je menej priamy ako vo vonkajšom prostredí, keďže vzduch musí obchádzať mnoho prekážok.

Vertikálne prúdenie vzduchu vzduchu je spôsobené ohrievaním a chladením vzduchu v rôznych výškach. Zmeny teploty sú zápríčené technickým vybavením alebo prestupom energie z exteriéru a je ním ovplyvnený prestup tepla do a z materiálu. Prúdiaci vzduch odvádza z povrchov materiálov teplo inou mierou ako statický v závislosti od uhlu povrchu s rovinou. Smer tohoto prúdenia je skoro vždy zdola nahor.

Vlhkosť, tak ako v exteriéri ovplyvňuje jednotlivé tepelné vlastnosti vzduchu a materiálov, z ktorých sú vyhotovené steny. Vlhkosť vzduchu sa dá znížiť odvlhčovačmi alebo zvýšiť zvlhčovačmi ovzdušia. Takýmto spôsobom sa dá udržiavať stála vlhkosť v miestnostiach.

Na rozdiel od vonkajšieho prostredia, kde je táto hmotnosť mnohonásobne väčšia, je dôležité brať do úvahy aj hmotnosť vzduchu, keďže je od neho závislá tepelná kapacita miestnosti, ktorá určuje, koľko energie je potrebné dodať na zvýšenie teploty a koľko energie dokáže miestnosť uchovať. Od tepelnej kapacity miestnosti závisí to ako rýchlo miestnosť chladne a ako rýchlo ju ohrievače dokážu ohriať, respektíve klimatizačné jednotky ochladiť.

2.6 Vlastnosti stien

Teploizolačné vlastnosti stien sú ovplyvnené ich hrúbkou, veľkosťou povrchu, materiálom z ktorého sú postavené a uhlom v akom sú naklonené oproti rovine. Tieto vlastnosti ovplyvňujú množstvo tepla, ktoré stenami prechádza a dodáva energiu prostrediu na druhej strane.

Pre jednotlivé materiály existuje experimentálne zistená hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti $[\text{W/mK}]$. Súčiniteľ tepelnej vodivosti určuje, koľko energie za sekundu, prejde materiálom s hrúbkou jeden meter na každý štvorcový meter povrchu pri rozdieli teplôt jeden Kelvin.

Množstvo tepla ktoré prestúpi stenou na plochu, možno vyjadriť pomocou veličiny, súčiniteľu prestupu tepla U $[\text{W/m}^2\text{K}]$ a veľkosti povrchu steny.

$$U = \frac{1}{R_i + R + R_e}$$

Kde R_i $[\text{m}^2\text{K/W}]$ je odpor pri prestupe tepla na vnútornej strane, R_e $[\text{m}^2\text{K/W}]$ je odpor pri prestupe tepla na vonkajšej strane a R $[\text{m}^2\text{K/W}]$ je odpor pri prestupe tepla konštrukciou. Niektoré normové hodnoty pre R_i a R_e uvádzame v Tabulke 2.1.

Obdobie	Povrch	Konštrukcia	Tepelný odpor pri prestupe tepla $[\text{m}^2\text{K/W}]$
zimné	vonkajší	jednoplášťová dvojplášťová	0.04 rovný vnútornému
zimné/letné	vnútorný	stena strecha podlaha	0.13 0.10 0.17
zimné	zemina		0
letné	vonkajší		0.08

Tabulka 2.1: Odpory pri prestupe tepla

Pri stavbách sa kladie dôraz na to, aby bol súčiniteľ prestupu tepla na obvodových stenách, stenách medzi vnútorným a vonkajším prostredím, čo najmenší a teda výmena tepla medzi vonkajším a vnútorným prostredím bola minimálna.

Pri výpočte tepelného odporu konštrukcie R s n vrstvami materiálov použijeme hrúbku jednotlivých vrstiev d_i $[\text{m}]$ a ich súčiniteľ tepelnej vodivosti λ_i $[\text{W/mK}]$.

$$R = \sum_{i=0}^n \frac{d}{\lambda}$$

[6]

2.7 Technické parametre stien

Pri výbere materialov na stavbu stien sú pre náš model dôležité najmä ich teploizolačné vlastnosti. Steny sa vo väčšine prípadov skladajú z viacerých vrstiev, moderné materiály však dokážu svojou univerzálnou povahou tento počet znížiť. Vrstvy majú rôzne funkcie, od izolačných, cez nosné až po estetické.

Na jadro steny, nosnú vrstvu steny, budeme uvažovať materialy, ktoré sa používajú štandardne a majú dostatočnú nosnosť. Sú to najmä pórobetonové tvárnice, betonové tvárnice a keramické tvárnice. V tabuľke 2.2 uvádzame prehľad niekoľkých materialov a ich tepelných odporov. Pri betónových tvárniciach je tento odpor veľmi nízky a majoritnú časť odporu steny tvorí iná tepelná izolácia. Táto sa môže nachádzať na povrchu alebo ňou môže byť tvárnica vyplnená.

Typ	Hrúbka [mm]	Tepelný odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]
Pórobetonové tvárnice		
Ytong Lambda YQ	500	6,49
Ytong Lambda YQ	450	5,84
Ytong Univerzal	375	3,23
Ytong Univerzal	250	2,16
Betónové tvárnice		
Leier UNI	300	-
Leier FF20	200	-
Leier VF10	100	-
Keramické tvárnice		
KMB PROFIBLOK	300	1,74
LeierPLAN 45 N+F	450	2,88

Tabuľka 2.2: Prehľad materiálov na stavbu stien, data uvádzané výrobcom

Ďalšou vrstvou steny je izolačná vrstva tvorená materialom s vysokým tepelným odporom. Sú to najmä minerálne vaty, penový polystyrén a drevotrieskové a iné vaty z prírodných materiálov. Vo všeobecnosti sú to materialy, ktoré obsahujú vzduchové vankúše alebo bubliny. Prehľad niekoľkých typov uvádzame v tabuľke 2.3.

Typ	Hrúbka [mm]	Tepelný odpor [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$]
Minerálne vaty		
ISOVER TF PROFI	120	3.33
ISOVER FASSIL	100	2.86
KNAUF FKD S THERMAL	100	2.86
Penový polystyrén		
ISOVER EPS 70F	120	3.08
Rapol EPS 70F	100	2.56
Drevotrieskové izolácie		
STEICO Therm	40	1,00

Tabuľka 2.3: Prehľad izolačných materiálov, data uvádzané výrobcom

Poslednou vrstvou steny su omietky, stierky a farby. Tieto maju vo väčšine prípadoch zanedbateľne nízky tepelný odpor kvôli svojej malej hrúbke a materiálu, ktorý nie je určený na izolovanie. Ich funkcia je hlavne estetická. Pri výpočte súčiniteľa prestupu tepla preto nebudeme túto vrstvu uvažovať.

2.8 Technické parametre podlahy a stropu

Rovnako ako steny je pre výpočet prestupu tepla potrebné poznať aj teploizolačné vlastnosti podlahy a stropu. Podlahy a stropy sa taktiež skladajú z niekoľkých vrstiev. Podklad tvorí zvyčajne betón, na ktorom je izoláčna vrstva. Nad izolačnou vrstvou sa môže nachádzať ďalšia betónová vrstva. Prehľad podlahových materiálov sme uviedli v tabuľke 2.4. Uvažovali sme, pre betón, tabuľkový súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda = 1.43 \frac{W}{mK}$. [2]

Typ	Hrúbka [mm]	Tepelný odpor [$m^2.K/W$]
	Betónová vrstva	
-	200	0.14
-	150	0.1
	Podlahová izolácia	
ISOVER N 40	40	1.11
ISOVER N 50	50	1.39
	Stropná izolácia	
Isover Domo Plus	140	3.65

Tabuľka 2.4: Prehľad podlahových materiálov, data uvádzané výrobcom

Vonkajšie vyhotovenie podlahy zahŕňa ďalšiu vrstvu, podlahovú krytinu. Podlahová krytina nie je priamo určená na izoláciu tepla a jej teploizolačné vlastnosti sú slabé. Tak isto ako pri nátere budeme túto vrstvu pri výpočte súčiniteľa prestupu tepla zanedbávať.

2.9 Tepelné mosty

Tepelné mosty sú miesta v stene, kde sú teploizolačné vlastnosti zhoršené. Sú to rôzne konštrukčné prvky, ktorých materiál nie je schopný izolovať teplo dostatočne a jeho funkcia je iná, napríklad nosná. Ako tepelné mosty budeme pre náš modelový výpočet uvažovať okná a dvere, aj keď pri zle izolovanej stene, môže nastať taký prípad, že majú okná alebo dvere lepšie teploizolačné vlastnosti ako stena.

Okná sa väčšinou skladajú z viacerých materiálov a výrobcovia uvádzajú univerzálny súčiniteľ prestupu tepla pre akúkoľvek veľkosť okna, tepelný odpor pre konkrétny typ okna alebo súčiniteľ prestupu tepla pre rám a okno zvlášť. V tabuľke 2.5 sú uvedené niektoré typy okien a ich súčinitele prestupu tepla.

Typ	Súčiniteľ prestupu tepla [$W/m^2.K$]
Plastové okná	
VEKRA Premium EVO	0.70
VEKRA Komfort EVO	0.70
Drevené okná	
Natura 94	0,70
Natura 78	1,2

Tabuľka 2.5: Prehľad typov okien, data uvádzané výrobcom

Pri dverách, podobne ako pri oknách, je súčiniteľ uvádzaný výrobcom univerzálne alebo pre konkrétny typ a veľkosť dverí. V tabuľke 2.6 uvádzame prehľad niekoľkých typov dverí a ich súčiniteľov prestupu tepla.

Typ	Súčiniteľ prestupu tepla [W/m ² .K]
Exteriérové dvere	
ADLO TESIM	1,4
SAFELINE MODEL AT507	1.2
Interiérové dvere	
MDF 40mm	3.44
Drevo/Masiv	4.54

Tabuľka 2.6: Prehľad súčiniteľov prestupu tepla typov dverí, data uvádzané výrobcom

2.10 Vykurovanie

Vykurovanie je proces, ktorý dodávaním tepelnej energie upravuje teplotu vnútorného vzduchu na požadovanú hodnotu. Energiu získava spaľovaním palív, z elektrickej energie alebo energie vonkajšieho prostredia. Energia je predávaná do vnútorného prostredia so vzduchom pomocou vykurovacieho média, napríklad vody alebo oleja, alebo priamo, napríklad krb alebo elektrický ohrievač. Rôzne spôsoby vykurovania sa líšia hlavne účinnosťou, výkonom, nákupnou cenou, nákladmi na údržbu a prevádzku. V tabuľkách sú použité priemerné hodnoty udávané výrobcami v produktoch strednej triedy. Zdroje tepla môžu obsahovať akumulčné časti, ktoré tepelnú energiu odovzdávajú vzduchu postupne. Celková energia je však rovnaká.

2.11 Vykurovanie plynom

Pri vykurovaní zemným plynom sa pri nových riešeniach používajú kondenzačné plynové kotle. Tieto kotle dosahujú účinnosť až 98%. Kondenzačné kotle vo väčšine prípadov podporujú moduláciu výkonu. Staršie teplovodné kotle majú účinnosť až 90%. Zdroje tepla v miestnostiach môžu byť nezávislé ale vo veľkej väčšine prípadov je teplo distribuované z jedného zdroja pomocou tepelného média, spravidla vody. Pri distribúcií dochádza k stratám energie v závislosti na tepelnom mediu a spôsobe transportu. Orientačné náklady sú uvedené v tabuľke 2.7.

Typ	Cena [eur/kWh]	Mesačne [eur]	Účinnosť	Cena s účinnosťou [eur/kWh]
Kondenzačný kotol	0.0304	13.36	0.98	0.0310
Teplovodný kotol	0.0304	13.36	0.90	0.0338

Tabuľka 2.7: Orientačné ceny za tepelnú energiu zo spalovania plynu v roku 2018

2.12 Vykurovanie elektrickou energiou

Premena elektrickej energie na tepelnú má účinnosť takmer 100%. Výkon elektrického vykurovania je dobre regulovateľný. Zpravidla má najnižšie obstarávacie ceny. Zdroje tepla sú pre každú miestnosť úplne nezávislé. Orientačné náklady sú uvedené v tabuľke 2.8.

Typ	Cena [eur/kWh]	Mesačne [eur]	Účinnosť	Cena s účinnosťou [eur/kWh]
Elektrický žiarič Akumulačné kachle	0.1368	12.53	1	0.1368

Tabuľka 2.8: Orientačná cena za tepelnú energiu z elektrickej energie v roku 2018

2.13 Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlá využívajú energiu nízkopotenciálneho tepla získanú z vonkajšieho prostredia, presnejšie zo vzduchu alebo zo zeme. Je to jedno z najekologickejších riešení, keďže neprodukuje vlastné odpadové látky a zároveň má vysokú účinnosť. Vzhľadom k spotrebe elektrickej energie sa javí, že má účinnosť viac ako 100%. Energia však nie je vytváraná ale len transformovaná. Elektrická energia je spotrebovaná hlavne kompresorom. Orientačné náklady sú uvedené v tabuľke 2.9.

Typ	Cena [eur/kWh]	Mesačne [eur]	Účinnosť	Cena s účinnosťou [eur/kWh]
Tepelné čerpadlo	0.1368	12.53	4.31	0.0317

Tabuľka 2.9: Orientačná cena za tepelnú energiu z technológie tepelného čerpadla v roku 2018

2.14 Chladenie

Chladenie sa zabezpečuje pomocou klimatizačných jednotiek. Všetky pracujú na princípe tepelného čerpadla a líšia sa výkonom a použitým tepelným médiom. Parameter SEER udáva účinnosť chladenia vzhľadom na spotrebu elektrickej energie. Orientačné náklady sú uvedené v tabuľke 2.10. V tabuľkách sú použité priemerné hodnoty udávané výrobcami v produktoch strednej triedy. Účinnosť, ktorá je väčšia ako jedna neznamena, že by klimatizačná jednotka produkovala viac energie ako je dodávané. Túto energiu len transformuje. Je to matematický pomer príkonu a chladiaceho výkonu.

Typ	Cena [eur/kWh]	Mesačne	Účinnosť	Cena s účinnosťou [eur/kWh]
Klimatizačná jednotka	0.1368	12.53	6.1	0.0224

Tabulka 2.10: Orientačná cena za chladenie

2.15 Vetranie

Budova nemôže byť pochopiteľne hermeticky uzavretá a musí mať zariadenie na výmenu vzduchu. Takúto výmenu dokážu zaobstarať napríklad okná za cenu straty tepelnej energie alebo rôzne ventilačné a klimatizačné jednotky.

Ideálna situácia nastáva, keď výmenu vzduchu dokáže vykonávať klimatizačná jednotka. Tepelné straty su vtedy minimálne.

2.16 Vplyv jednotlivých spôsobov na životné prostredie

Plyn, ako zdroj tepla je ekonomicky veľmi výhodný a v roku 2018 je stále v prepočte na jednotku vyprodukovanej tepelnej energie najlacnejší. Aj pri dokonalom spalovaní plynu však vzniká oxid uhličitý, ktorý patrí medzi najväčšie skleníkové plyny. Zásoby tohoto fosílného paliva sú obmedzené a cena sa môže v budúcnosti, počas obdobia jeho nedostatku, zvyšovať.

Pri použití elektrickej energie sa zatiaľ produkcia oxidu uhličitého presúva o niekoľko procesov ďalej od koncového užívateľa. Túto produkciu je však možné eliminovať použitím technológií, ktoré neprodukujú tieto odpadné látky. Elektrická energia, v kombinácii s vysokou účinnosťou, je v súčasnosti drahšia no má do budúcnosti väčší ekonomický aj ekologický potenciál. Je ju totiž možné získavať spôsobmi, ktoré nezaťažujú životné prostredie.

Kapitola 3

Návrh modelu

3.1 Kyberfyzikálny systém

Pri návrhu budeme o energeticky úspornej budove uvažovať ako o kyberfyzikálnom systéme, ktorý má svoju fyzikálnu časť a časť tvorenú počítačovými prvkami. Fyzikálnu časť tvoria senzory a ovládače. Počítačovú časť tvorí kontrolér, ktorý na základe vstupov z fyzikálnej časti kontroluje výstupy.

Kontrolér môže poskytovať aj ďalšie funkcie ako napríklad konektivitu k iným zariadeniam. Je ho pomocou nich možné napríklad konfigurovať alebo kontrolovať. Tieto funkcie však nebudú predmetom nášho modelu.

3.2 Vonkajšie prostredie

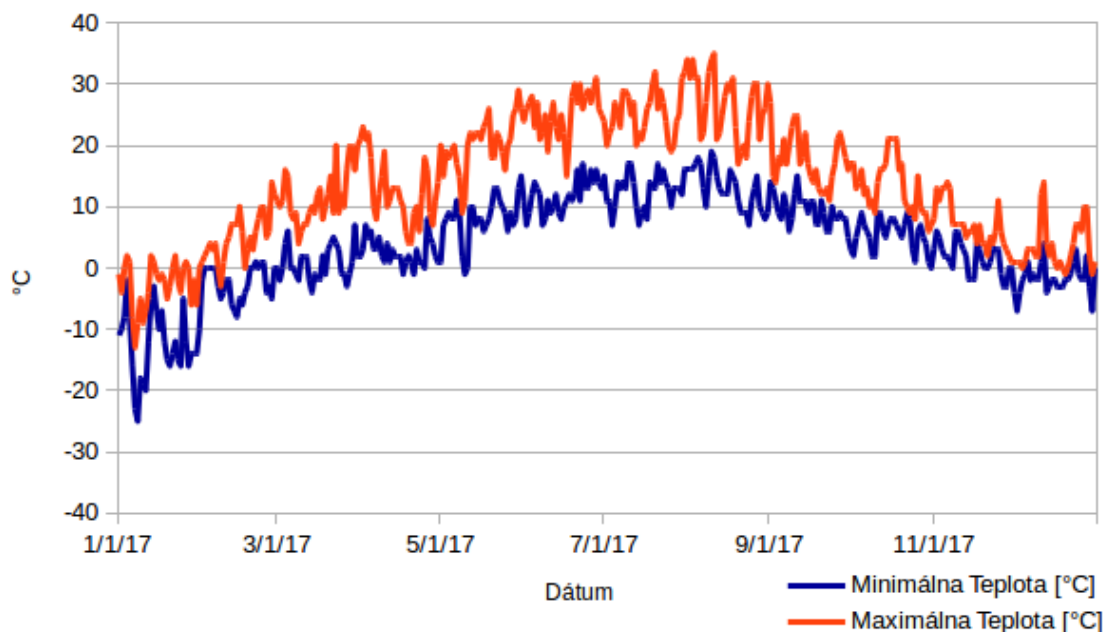
Model domu, ďalej iba model, bude zasadený do mierneho pásma, ktoré je charakteristické pravidelnými zmenami teplôt s periódou jeden rok. Pričom najnižšie teploty dosahuje vzduch na konci Decembra, v Januári alebo na začiatku Februára a najvyššie na konci J Auguste. Ďalej sa teplota vzduchu mení počas dňa v intervale od maximálnej teploty do minimálnej teploty pre daný deň. Ročný chod minimálnych a maximálnych denných teplôt v roku 2017 je znázornený na obrázku 3.1.

Geografická poloha a aj typ ročného chodu teplôt je pre náš model definovaná ročnými teplotami. Teplota vzduchu vonkajšieho prostredia je faktor, ktorý z najväčšej časti ovplyvňuje teploty v jednotlivých miestnostiach a preto z neho model prostredia vychádza. Hodnotu teploty vzduchu vonkajšieho prostredia môžeme modelovať viacerými spôsobmi. [1]

3.3 Model počasia s dennou teplotou

Model počasia, ktorý má pre každý deň v roku uloženú maximálnu a minimálnu teplotu vonkajšieho prostredia a teplota počas dňa je aproximovaná pomocou vhodne zvolenej funkcie, ktorej maximum je v maximalnej dennej teplote a minimum v minimálnej. Výhodou tohoto modelu je pomerne vysoká presnosť a nevýhodou väčšie množstvo dát, ktoré je potrebné k jeho chodu. Pre jeden rok je teda potrebné mať sedemstotridsať hodnôt teplôt vzduchu. Prestupné roky základný model uvažovať nebude ale dá sa k tomu jednoducho upraviť.

Obrázek 3.1: Maximálne a minimálne teploty prostredia počas roku 2017



3.4 Model počasia s polynomiálnou funkciou

V tomto modeli sú teploty počas roka nahradené polynomiálnou funkciou a denné teploty, ktorej maximum je v maximálnej teplote ročného chodu teplôt a minimum v minimálnej. Tvar grafu tejto funkcie by sa mal podobáť na tvar grafu ročných teplôt. Pri takomto modeli je nevýhodou nízka presnosť a zložitosť úlohy nájsť vhodnú aproximačnú funkciu. Výhodou modelu je menšie množstvo dát potrebných pre jeho funkciu. [1]

3.5 Model pre teploty počas dňa

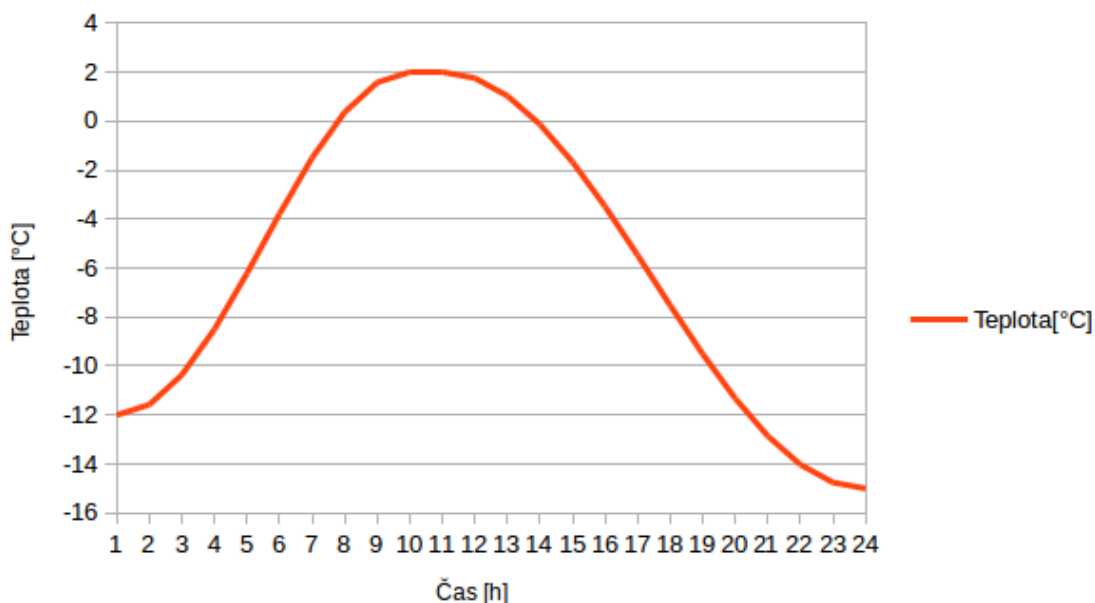
Na modelovanie teplôt počas dňa použijeme pre každý deň funkciu, ktorej definičným oborom bude čas vrámci jedného dňa a funkčnou hodnotou bude aktuálna teplota. Pre každý deň sa budú v tejto funkcii meniť koeficienty predstavujúce denné maximálne a minimálne teploty.

Z povahy zmeny teplôt je zjavné, že takáto funkcia môže obsahovať vhodne posunutú, funkciu sínus, respektíve kosínus. Definičný obor rozdelíme na viac intervalov. Maximum tejto funkcie bude zodpovedať dennej maximálnej teplote a minimum minimalnej. Nasleduje zápis funkcie ktorá aproximuje teploty počas dňa.

$$T(t) = \begin{cases} -((T_{max} - T_{min})/2)\cos(t(\pi/9)) + ((T_{max} + T_{min})/2) & t \leq 9 \\ ((T_{max} - T_{min+1})/2) * \cos((t - 10) * (PI/13)) + ((T_{max} + T_{min+1})/2) & \text{inak} \end{cases}$$

Kde T_{max} je maximálna teplota aktuálneho dňa, T_{min} je minimálna teplota aktuálneho dňa, T_{min+1} je minimálna teplota nasledujúceho dňa a t je čas v rámci dňa. [8] Na obrázku 3.2 je možné vidieť aproximované teploty počas dňa pre $T_{max} = 2^\circ C, T_{min} = -12^\circ C, T_{min+1} = -15^\circ C$

Obrázek 3.2: Aproximácia denných teplôt



3.6 Prúdenie vzduchu

Prúdenie vzduchu je síce tiež faktor, ktorý ovplyvňuje tepelné procesy budovy ale v našom modeli nie je zohľadnené z dôvodu príliš vysokej zložitosti tohoto deju. Absencia tohoto prvku môže ovplyvniť model hlavne počas chladných mesiacov roka, kedy bude modelová spotrebovaná energia menšia ako reálna. Teplo bude cez obvodové steny rýchlejšie prestupovať do vonkajšieho prostredia.

3.7 Slnečné žiarenie

Časť energie vstupuje do domu aj vo forme žiarenia. Dáta o žiarení slnka pre určitú geografickú polohu však niesú jednoducho modelovateľné. Modelová spotrebovaná energia je v tomto prípade zvýšená oproti reálnej.

3.8 Modelované vlastnosti budovy

Model budovy zahŕňa konkrétnu množinu vlastností, ktorá je podmnožinou množiny reálnych vlastností budovy.

Základnou vlastnosťou je teplota, ktorá sa mení v čase. Zmena teploty v čase závisí hlavne od ďalších vlastností modelu. Vzájomné rozloženie miestností a teploizolačné parametre stien medzi miestnosťami sú vlastnosti, ktoré sú s časom nemenné a je nimi určený tvar budovy a povaha materiálov z ktorých je budova postavená. Prítomnosť používateľa je určená intervalom v čase dňa.

Výkon zdrojov tepla a chladu je taktiež statický parameter a menia sa len koeficienty ktoré, určujú či je daný zdroj tepla alebo chladu zapnutý alebo vypnutý.

3.9 Modelový čas

Priebeh modelu štandardne trvá jeden rok modelového času, tak aby bolo možné zistiť ročnú spotrebu energie a prípadne zvoliť vhodný paušál u dodávateľa energie. Jeden deň trvá 24 najmenších jednotiek z čoho je zjavné, že najmenšia jednotka času predstavuje jednu hodinu.

Keďže fyzikálne koeficienty a konštanty sú v tabuľkách a u výrobcov materiálov uvádzané v jednotkách, ktoré používajú sekundy alebo watt, je potrebné tieto jednotky prepočítať na hodiny respektive jouly za hodinu.

3.10 Usporiadanie miestností

Spôsob, akým sú miestnosti v modeli budovy vzájomne rozmiestnené určuje matica, v ktorej sú súčinitele prestupu tepla vynásobené plochou jednotlivých stien medzi miestnosťami. Tieto výsledné koeficienty budeme označovať $A[\frac{h}{JK}]$. Ak sa miestnosti nedotýkajú alebo sa jedná o tú istú miestnosť, je na príslušnom mieste hodnota nulová. Súčinitele svojou hodnotou určujú aj plochu ktorú zaberajú tepelné mosty, napríklad okná a dvere.

Vyplyvajú z modelového času sú tieto súčinitele A_i uvedené v jednotkách $[\frac{h}{JK}]$. Matica, aj keď má len dva rozmery, umožňuje aj modelovanie viacerých poschodí. Miesto koeficientu, ktorý určuje vlastnosti steny sa v takom prípade použije koeficient ktorý bude určovať vlastnosti podlahy, respektive stropu. Na obrázku 3.3 je možné vidieť pôdorys zodpovedajúci matici v tabuľke 3.1.[3]

	Miestnosť 0	Miestnosť 1	Miestnosť 2	Miestnosť 3
Miestnosť 0	0	A_{01}	A_{02}	A_{03}
Miestnosť 1	A_{10}	0	A_{12}	0
Miestnosť 2	A_{20}	A_{21}	0	A_{23}
Miestnosť 3	A_{30}	0	A_{32}	0

Tabuľka 3.1: Usporiadanie miestností reprezentované hodnotami A_i

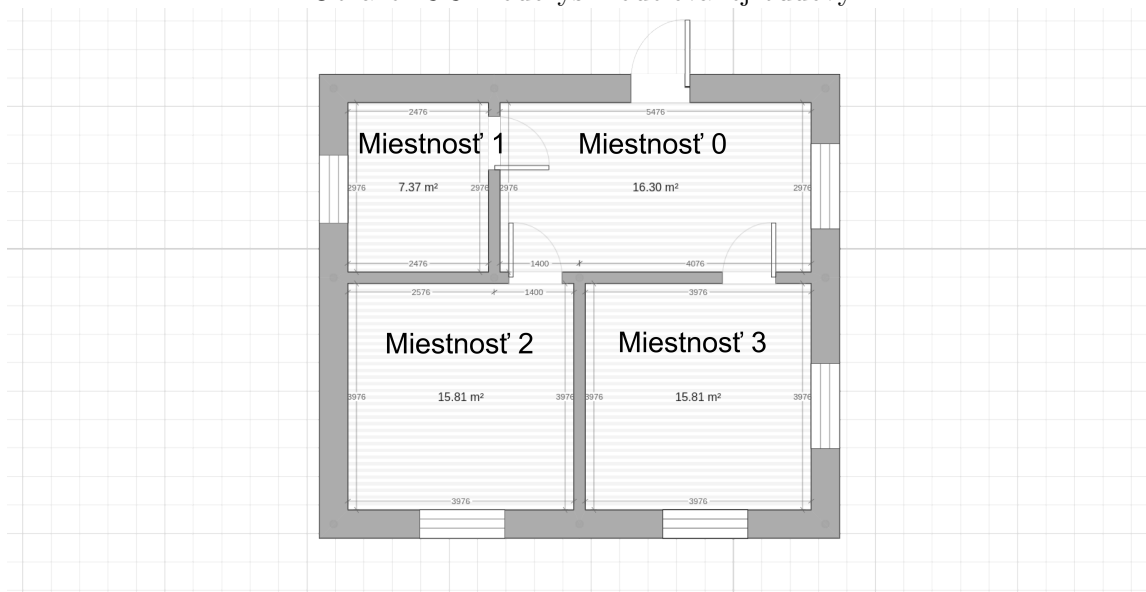
3.11 Obvodové steny

Okrem stien, ktoré miestnosti zdieľajú so susediacimi miestnosťami, model obsahuje aj steny, podlahy a stropy, ktoré susedia s vonkajším prostredím. Kontakt s vonkajším prostredím je určený vektorom hodnôt súčinov súčinitlov prestupu tepla a plochy stien jednotlivých miestností a vonkajšieho prostredia A_{Ei} . Tieto súčinitele sú rovnako ako pri matici reprezentujúcej pôdorys v jednotkách $[\frac{h}{JK}]$. V tabuľke 3.2 môžeme vidieť vektor hodnôt pre pôdorys na obrázku 3.3.

Miestnosť 0	Miestnosť 1	Miestnosť 2	Miestnosť 3
A_{E0}	A_{E1}	A_{E2}	A_{E3}

Tabuľka 3.2: Koeficient A izieb a vonkajšieho prostredia.

Obrázek 3.3: Pôdorys modelovanej budovy



3.12 Vykurovanie

Regulovateľnú tepelnú energiu do izieb dodávajú zdroje tepla, ktoré majú dva parametre a to výkon a aktuálnu funkčnosť.

Výkon je určený vo vektore výkonov, pre každú miestnosť zvlášť. Pokiaľ chceme namodelovať viac zdrojov tepla v jednej miestnosti, použijeme súčet výkonov všetkých zdrojov. V takomto prípade však nie je možné kontrolovať tieto zdroje jednotlivo. Výkon je určený v jednotkách $[\frac{J}{h}]$.

Zdroje je možné kontrolovať zvlášť pre každú miestnosť. Ak je vykurovanie zapnuté, pripočítava sa spotrebovaná energia a zároveň rastie tepelná energia v miestnostiach a ak prevyšuje energiu ktorá prestupuje z miestnosti do vonkajšieho prostredia alebo do okolných miestnosti, rastie aj teplota vzduchu v miestnosti.

Room 0	Room 1	Room 2	Room 3
P_0	P_1	P_2	P_3

Tabulka 3.3: Vektor výkonov zdrojov tepla

3.13 Tepelná kapacita miestnosti

Tepelná kapacita miestnosti určuje, koľko energie je potrebné do miestnosti dodať aby sa teplota miestnosti zdvihla. Kapacitu miestnosti určuje jednak hmotnosť vzduchu m v nej, jeho teplota, jeho merná tepelná kapacita pre túto teplotu c a tepelná kapacita iných predmetov v miestnosti.

Do tepelnej kapacity miestnosti je možné započítať aj kapacitu akumulácie časti ohrievača. Tento spôsob je ale len aproximácia a model nepočíta s prestupom tepla z akumulácie časti ohrievača do vzduchu v miestnosti a pokladá ich ako jednu entitu ohraničenú izolač-

nými vlastnosťami stien danej miestnosti. Presnosť takejto konfigurácie je väčšia pri dobre izolovaných stenách. Pre konfiguráciu n entít platí nasledujúci vzťah.

$$C = \sum_{n=0}^n m_n * c_n$$

kde C je tepelná kapacita miestnosti, zadaná ako parameter modelu, m_n je hmotnosť entity n a c_n je merná tepelná kapacita entity n .

3.14 Teplota miestnosti

Teplota vzduchu v miestnosti, ďalej len teplota miestnosti, je premenlivá s časom a jej prírastok alebo úbytok je určený množstvom energie, ktorá vstupuje do miestnosti a tepelnou kapacitou miestnosti. Vstupom energie sa v intenciach návrhu modelu myslí aj energia so zápornou hodnotou a model s takouto energiou počíta rovnako ako s kladnou. Energia do miestnosti vstupuje z viacerých zdrojov. Kontrolovateľným zdrojom energie sú ohrievače a klimatizácia. Nepriamo kontrolovateľným zdrojom sú steny s vedľajšími miestnosťami a nekontrolovateľným zdrojom su obvodové steny.

$$t' = \frac{Q_r + Q_h + Q_c + Q_e}{C}$$

kde Q_r je teplo prijaté zo susediacich izieb, Q_h je teplo prijaté z ohrievačov, Q_c je teplo prijaté klimatizáciou, Q_e je teplo prijaté z prostredia a C je tepelná kapacita miestnosti.

Teplo Q_r vstupujúce do miestnosti i z okolitých izieb je dané sumou súčinov všetkých rozdielov teplôt Δt_j a koeficientou prestupu tepla s plochou A_{ij} medzi miestnosťou i a miestnosťou j .

$$Q_r = \sum_{j=0}^n A_{ij} * \Delta t_j$$

Teplo Q_h vstupujúce do miestnosti i z ohrievačov sa rovná súčinu výkonu ohrievača P_i a koeficientu funkčnosti f_h , ktorý určuje či je ohrievač zapnutý.

$$Q_h = P_i * f_h$$

Teplo Q_c je analógiou tepla Q_h pre chladenie miestnosti. Výkony klimatizácie P_{ci} sú udané ako záporné hodnoty.

$$Q_c = P_{ci} * f_c$$

Teplo Q_e , vstupujúce do miestnosti i z vonkajšieho prostredia sa rovná súčinu koeficientu prestupu tepla s plochou A_{ei} medzi miestnosťou i a vonkajším prostredím a rozdielu teploty Δt_i medzi miestnosťou i a vonkajším prostredím.

$$Q_e = A_{ei} * \Delta t_i$$

3.15 Používateľ

Prítomnosť používateľa v budove je jedným z prvkov, ktorý dokáže ovplyvňovať chovanie ohrievačov a chladienia. Bez prítomnosti užívateľa nie je potrebné udržiavať v miestnostiach teplotu potrebnú pre ľudský komfort. Pre náš model je podstatné vedieť okamih príchodu prvého používateľa a moment odchodu posledného používateľa. Zisťovať prítomnosť používateľa je možné viacerými spôsobmi.

V reálnom čase môžeme zisťovať prítomnosť používateľa pomocou rôznych senzorov. Takýto spôsob však nie je vhodný, lebo ohrievanie miestnosti na požadovanú teplotu je proces ktorý trvá určitý časový interval a vznikol by úsek v čase kde by používateľ bol v budove ale teplota by bola pod hraničnou ľudského komfortu.

Spôsob akým je možné tento nekomfort odstrániť, je udržiavať komfortnú teplotu po celý rok. toto riešenie však zbytočne zvyšuje spotrebu.

Kompromisom medzi perpetuálnym udržiavaním a sledovaním prítomnosti v reálnom čase je udržiavať teplotu podľa určitého časového plánu. Ak napríklad predpokladáme, že náš model je miestom každodennej práce od ranných hodín, môžeme nastaviť ohrievanie alebo chladienie tak, aby po príchode používateľa bola teplota v komfortnej zóne. Pri odchode posledného používateľa, môže teplota opäť klesnúť.

3.16 Kontrolér

Za ovládanie jednotlivých komponentov je zodpovedný kontrolér. Je to prvok, ktorý zo vstupov a jeho konfigurácie za pomoci vnútornej logiky kontroluje výstupy. Výstupmi rozumieme ovládanie funkčnosti jednotlivých ohrievačov a klimatizačných jednotiek v miestnostiach.

Fyzikálnymi vstupmi pre kontrolér sú teploty miestností a teplota prostredia. Tieto teploty sú základom pre rozhodovaciu logiku kontroléra a sú kontrolované s určitou periodicitou.

Konfigurácia kontroléra určuje hornú a spodnú hranicu teploty v jednotlivých miestnostiach a časový interval počas ktorého je potrebné udržiavať túto teplotu. [5]

Kapitola 4

Implementácia modelu

4.1 UPPAAL SMC

Na implementáciu modelu sme použili nástroj *UPPAAL SMC*. Je to nástroj na modelovanie, validáciu a verifikáciu modelov systémov. Vstupným jazykom nástroja UPPAAL je kombinácia časovaných automatov a jazyka, ktorého syntax vychádza zo syntaxe jazyka *C*. Rozšírenie SMC pridáva do nástroja UPPAAL podporu pre stochastické modelovanie, napríklad pseudo-edeterministické rozhodovanie medzi dvoma prechodmi v automate. UPPAAL podporuje viacero typov premenných, ktoré je možné použiť prostredníctvom časovaných automatov alebo prostredníctvom jazyku.

Verifikačná časť UPPAAL slúži na vytváranie rôznych verifikačných a simulačných dotazov pomocou vlastného dotazovacieho jazyka. Simulačná časť umožňuje simuláciu modelu po krokoch s grafickým rozhraním.

Časované automaty sa skladajú z uzlov a hrán. Správanie automatu je určené parametrami na uzloch a hranách automatu.

Parametre hrán určujú, kedy sa môže prechod cez hranu uskutočniť a čo sa má počas prechodu vykonať. Parameter *select* slúži na výber určitého identifikátora, identifikátora použiteľného v ďalších parametroch, *guard* určuje či môže prechod cez danú hranu nastať, *synch* umožňuje synchronizáciu viacerých automatov pomocou kanálov a *update* umožňuje vykonávať postranné efekty mimo automatu. [4]

4.2 Model

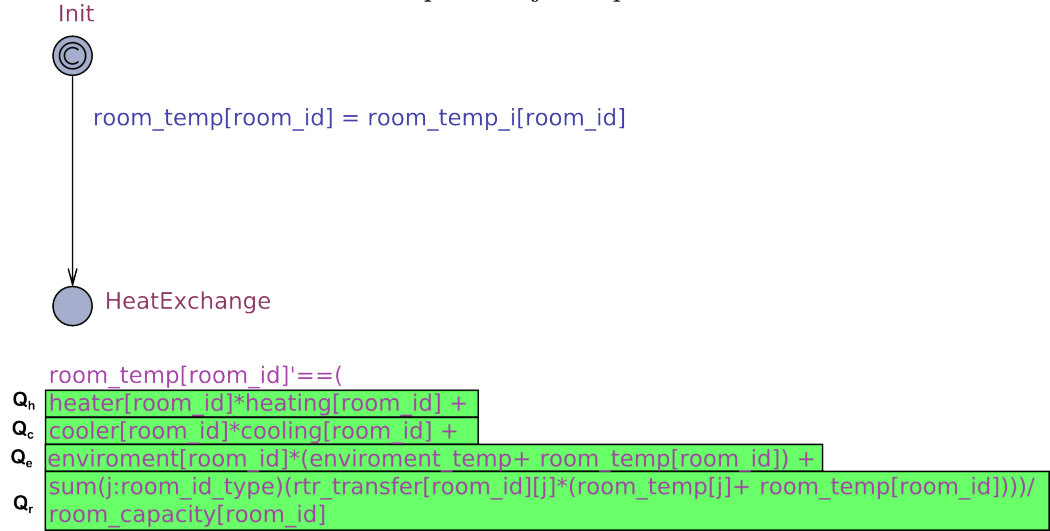
Model sa skladá z niekoľkých šablón, z ktorých každá predstavuje jeden alebo viac časovaných automatov a deklaračného kódu, kde sa nachádza konfigurácia modelu. Konfiguráciou modelu rozumieme nastavenie jednotlivých vlastností prvkov. Počet izieb je obmedzený len implementáciou datového typu *int*. Teploty v miestnostiach sú implementované ako datový typ *clock*, čo umožňuje ich použitie vo výrazoch v parametre *invariant* uzla. Ostatné hodnoty fyzikálnych veličín sú obmedzené implementáciou typu *double*.

4.3 Miestnosť

Základným prvkom nášho modelu je miestnosť. Miestnosť je modelovaná jednoduchým automatom, ktorý nastaví počiatočnú hodnotu teploty v miestnosti a následne sa riadi výrazom v parametre *invariant* uzla. Tento výraz modeluje fyzikálnu podstatu tepelnej

výmenny v rámci modelu. Je to analógia výrazu zo sekcie 3.14 prepísaná do syntaxe jazyka nástroja UPPAAL. Na obrázku 4.1 je možné vidieť automat ktorý implementuje správanie teploty v miestnosti s vyznačenými tepelami Q_h , Q_c , Q_r , Q_e , ktoré vstupujú do miestnosti.

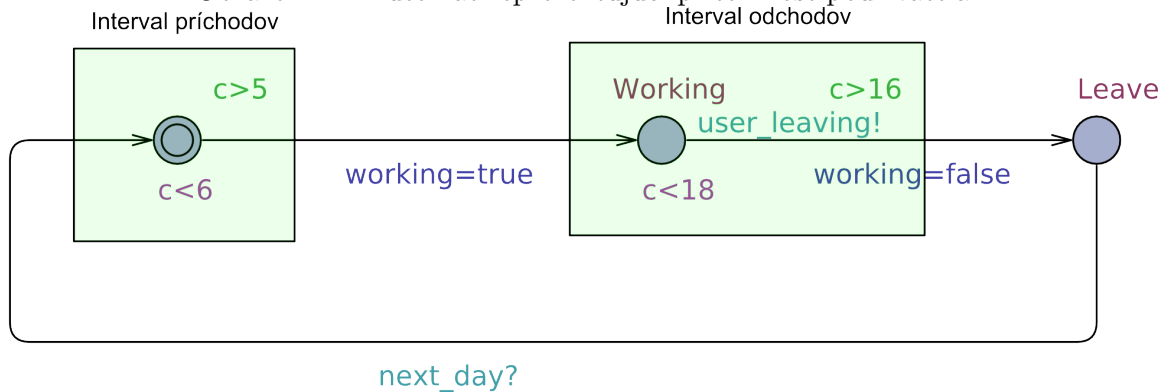
Obrázek 4.1: Automat reprezentujúci teplotu v miestnosti



4.4 Užívateľ

Používateľ je tvorený automatom, ktorý sa riadi 24 hodinovým cyklom. Pri vstupe do budovy sa nastaví premenná *working* a pri odchode sa premenná resetuje. Pri odchode tak isto vysiela signál *leaving*, ktorý využíva kontrolér. Na obrázku 4.2 sa nachádza automat, ktorý toto chovanie reprezentuje.

Obrázek 4.2: Automat reprezentujúci prítomnosť používateľa

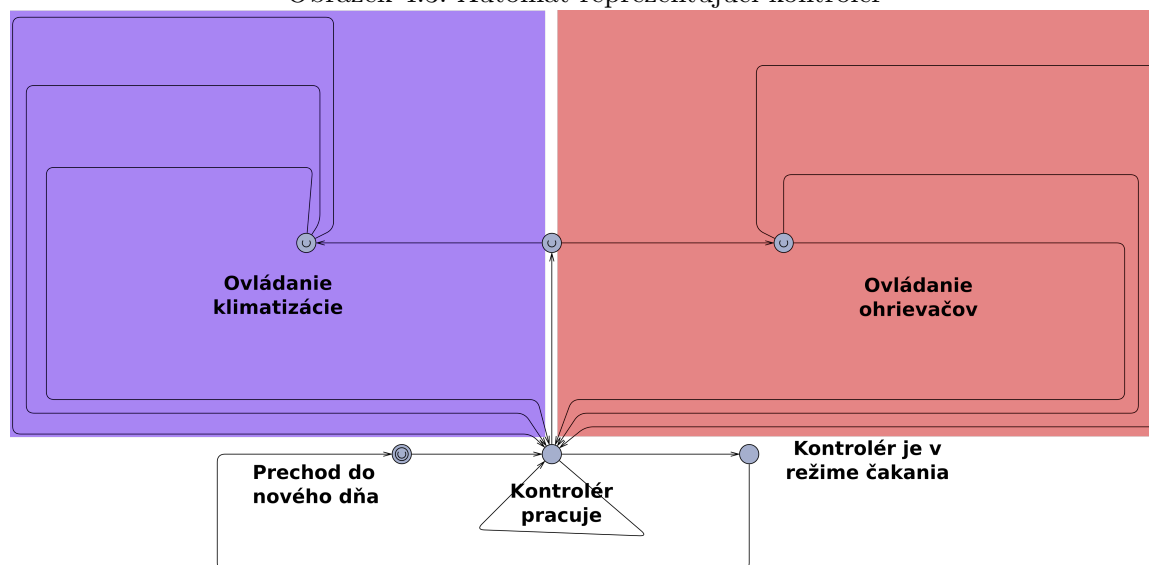


4.5 Kontrolér

Kontrolér je prvok ktorá určuje chovanie ostatných komponentov. Tento automat je možné implementovať rôznymi spôsobmi. Naša implementácia použitá v modeli, ktorý budeme

testovať a analyzovať nepoužíva moduláciu výkonu a skladá sa z dvoch častí. Správanie prvej časti určuje prítomnosť používateľa a časový plán. Správanie druhej časti určuje teplota v miestnostiach a teplota vonkajšieho prostredia. Obe časti sú približne vyznačené na obrázku 4.3.

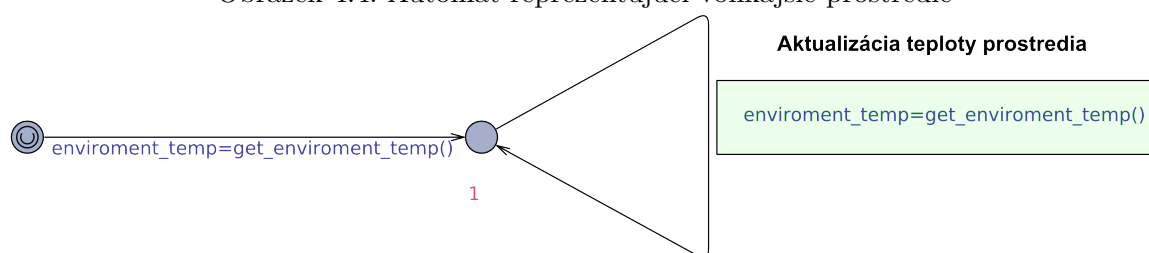
Obrázek 4.3: Automat reprezentujúci kontrolér



4.6 Vonkajšie prostredie

Prostredie alebo počasie je automat, ktorý kontroluje teplotu vzduchu vonkajšieho prostredia. Vo svojej deklaračnej časti má zadefinované denné, minimálne a maximálne teploty počas roka. Teploty počas dňa určuje pomocou funkcie popísanej v sekcii 3.5. Automat ktorý aktualizuje teplotu vonkajšieho prostredia je vyznačený na obrázku 4.4.

Obrázek 4.4: Automat reprezentujúci vonkajšie prostredie



4.7 Ohrievač

Ohrievač je reprezentovaný svojím výkonom a miestnosť, v ktorej je umiestnený určuje jeho identifikačné číslo. Výkony všetkých ohrievačov sú uvedené v jednom poli s veľkosťou rovnajúcou sa počtu izieb. V podobnom vektore je uvedená aj momentálna funkčnosť. Obe tieto polia su typu *double*. Pre prípad, že by sme chceli použiť moduláciu výkonu zadáme do premennej, ktorá reprezentuje momentálnu funkčnosť číslo v intervale $\langle 0.0, 1.0 \rangle$. Výkon je

potrebné zadať v jednotkách $[\frac{J}{h}]$, ktoré zodpovedajú modelovému času. Pokiaľ je ohrievač zapnutý, vstupuje do konkrétnej miestnosti s identifikačným číslom zhodným s ohrievačom teplo, ktoré je rovné výkonu ohrievača.

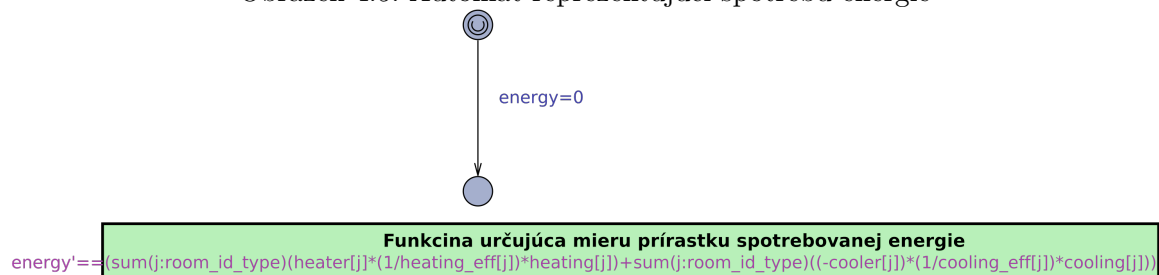
4.8 Chladenie

Analógiou ohrievača je klimatizácia. Rovnako je reprezentovaná dvoma poľami typu *double* o veľkosti rovnjej počtu izieb. Výkony sú uvedené so zápornými hodnotami v jednotkách $[\frac{J}{h}]$, čo reprezentuje správanie klimatizácie a zodpovedá modelovému času. Klimatizačná jednotka pridáva do miestnosti zápornú tepelnú energiu a tým znižuje jej teplotu podobne ako ohrievač.

4.9 Spotreba energie

Spotrebu energie monitoruje samostatný automat. Funguje veľmi podobne ako automat reprezentujúci teplotu v miestnosti. K absolútnej spotrebovanej energii pripočítava výkon zapnutých ohrievačov a klimatizačných jednotiek. Vo výraze je vyjadrená aj účinnosť týchto zariadení. Na obrázku 4.5 je znázornený automat a výraz, ktorý určuje prírastok spotrebovanej energie. Do spotreby energie je možné jednoducho pridať ďalšie spotrebiče upravením výrazu.

Obrázek 4.5: Automat reprezentujúci spotrebu energie



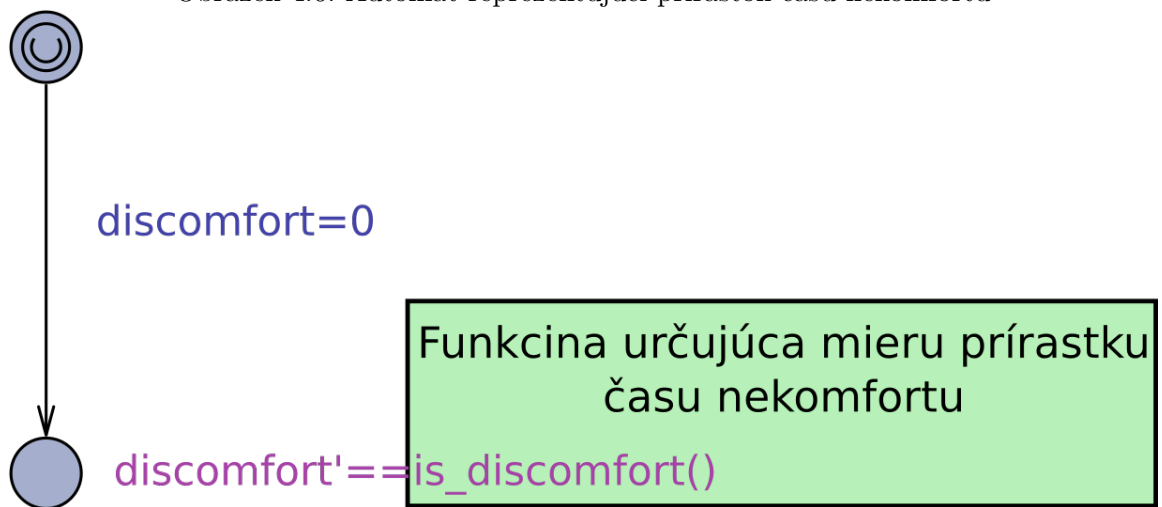
4.10 Čas nekomfortu

Čas nekomfortu sa zvyšuje pokiaľ nie je teplota miestnosti správna. Automat ktorý tento čas počíta je analógiou toho, čo počíta spotrebu energie. Miesto spotreby však prirátava jednotku ze každu hodinu počas ktorej nie je teplota v komfortnej zóne. Automat reprezentujúci prírastok môžeme vidieť na obrázku 4.6.

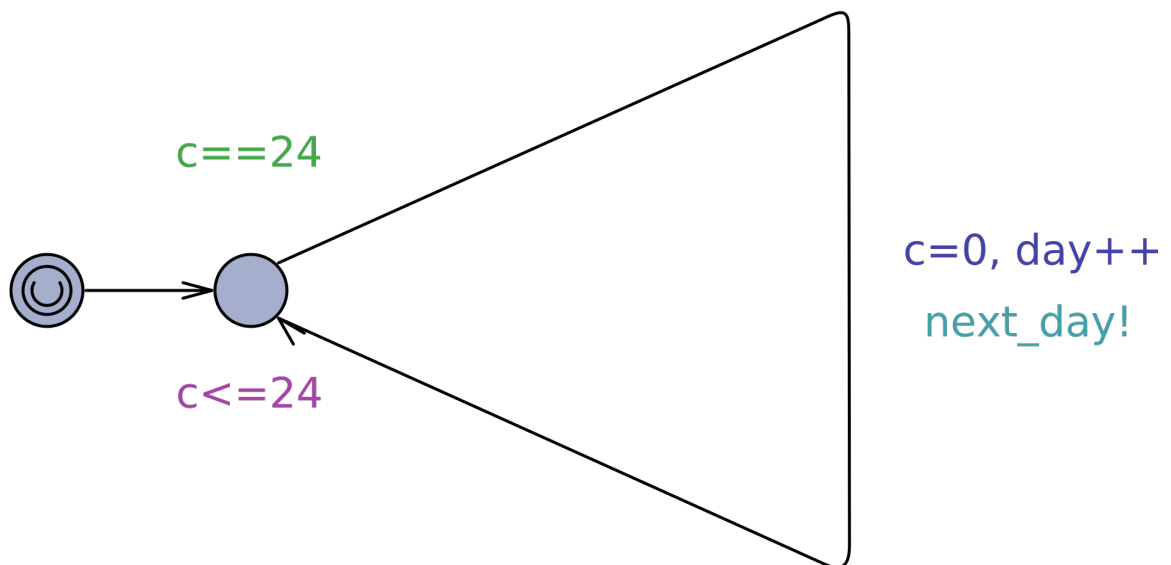
4.11 Denný režim

Deň má klasický dvadsaťštyrihodinový režim. Počítajú sa hodiny od nulte po dvadsiatu-tretiu a následne sa časovač pre deň zase vynuluje. Automat, ktorý toto správnaie modeluje je možné vidieť na obrázku 4.7.

Obrázek 4.6: Automat reprezentujúci prírastok času nekomfortu



Obrázek 4.7: Automat reprezentujúci denný režim



Kapitola 5

Testovanie modelu

5.1 Metodológia

Keďže porovnať model s jeho reálnym systémom nie je prakticky možné, budeme pri testovaní vychádzať z niektorých známych výsledkov a pomocou nich, pred každým testom vyslovíme predpoklad.

Po vykonaní testu tento predpoklad porovnáme s výsledkom testu a vyhotovíme záver.

5.2 Jednotné parametre

Pre všetky modely budeme používať rozsah teploty vzduchu v miestnostiach od 19°C po 21 °C. Pre chladenie bude kontrolér nastavený na maximálny rozdiel 9°C oproti vonkajšej teplote. Pôdorys budovy je možné vidieť na obrázku 3.3. Pozostáva zo štyroch miestností. Výška všetkých sien je $h = 2.6m$. Všetky vnútorné a vonkajšie steny sú zhotovené z rovnakého materiálu. Interierové dvere, ktoré sú použité majú všetky rovnakú veľkosť a tepolizolačné vlastnosti. Okná majú rôzne veľkosti ale ich koeficient prestupu tepla sa nelíši.

5.3 Parametre testovaného Modelu 1

Pre testovanie používame model s konkrétnymi parametrami, ktoré zodpovedajú fyzikálnym vlastnostiam stien, podláh, stropov a technického vybavenia. Rovnako použijeme reálne údaje o teplotách počas roka.

Vlastnosti materiálov sú vypočítané a nastavené podľa kombinácie tabuľkových hodnôt a hodnôt uvádzaných výrobcom. Projekt použitej budovy nie je overený staticky a pri testoch sa zameráme len na tepelné vlastnosti a energetickú náročnosť.

5.4 Rozmery miestností a materiály

Rozmery miestností určujú ich tepelnú kapacitu a veľkosti plôch stien. Teito rozmery sa do modelu nezadávajú priamo ale už po prepočte na jednotlivé energetické a tepelné parametre. Objem miestností dostaneme pomocou jednoduchého výpočtu z plochy podlahy a výšky stien.

$$V_i = S_i \cdot h_i [m^3]$$

Koeficienty A_{ei} a A_{ij} miestností vypočítame z veľkostí plôch a súčiniteľa tepelnej prestupnosti pre použité materiály. Nasleduje výpočet pre miestnosť s identifikačným číslom 0.

Ako materiál pre obvodové steny použijeme pórobetón s hrúbkou $d_0 = 450mm$ a tepelným odporom $R_0 = 5.84m^2K/W$ a minerálnu vatu s hrúbkou $d_1 = 100mm$ a tepelným odporom $R_1 = 2.86m^2K/W$. Použijeme normované tepelne odpory pri prestupe tepla na vonkajšej strane $R_{se} = 0.04m^2.K/W$ a na vnútornej strane $R_{si} = 0.13m^2.K/W$ a vypočítame celkový súčiniteľ prestupu tepla pre miestnosť 0.

$$U_{e01} = \frac{1}{R_{si} + R_0 + R_1 + R_{se}} = 0.11 \frac{W}{m^2K}$$

Z tejto hodnoty vypočítame koeficient A_{e01} , ktorý bude obsahovať aj plochu stien. Plocha stien v miestnosti jedna, susediacich s vonkajším prostredím, je $S_{e01} = 17.69m^2$.

$$A_{e01} = U_{e01} \cdot S_{e01} = 1.95 \frac{W}{K}$$

Ďalej vypočítame koeficient prestupu tepla s plochou A_{e02} pre okná. Použijeme okná s plochou $S_{e02} = 2.25m^2$ a súčiniteľom prestupu tepla $U_2 = 0.70 \frac{W}{m^2K}$.

$$A_{e02} = U_2 \cdot S_{e02} = 1.58 \frac{W}{K}$$

Nasledujúca časť sú dvere s plochou $S_{e03} = 1.99m^2$ a súčiniteľom prestupu tepla $U_3 = 1.4 \frac{W}{m^2K}$.

$$A_{e03} = U_{e03} \cdot S_{e03} = 2.79 \frac{W}{K}$$

Pre strop budeme uvažovať len jednu vrstvu a to minerálnu vatu s hrúbkou $d_4 = 140mm$ a tepelným odporom $R_4 = 3.17m^2K/W$. Plocha stropu je $S_{e04} = 16.30m^2$. Hodnota tepelného odporu na vnútornej strane pre stropy $R_{si} = 0.10m^2.K/W$.

$$U_{e04} = \frac{1}{R_{si} + R_4 + R_{se}} = 0.30 \frac{W}{m^2K}$$

A následne dopočítame koeficient A_{e04} pre strop.

$$A_{e04} = U_{e04} \cdot S_{e04} = 4.92 \frac{W}{K}$$

Posledná časť je podlaha. Počítame s tým, že spodná vrstva podlahy sa dotýka zeminu a preto použijeme $R_{se} = 0m^2.K/W$ a $R_{si} = 0.17m^2.K/W$. Betón má dohromady hrúbku $d_5 = 350mm$ a tepelný odpor $R_5 = 0.15m^2.K/W$. Izolácia má hrúbku $d_6 = 40mm$ a tepelný odpor $R_6 = 1.11m^2.K/W$. Vypočítame súčiniteľ tepelného prestupu pre podlahu a koeficient A_{e05} .

$$U_{e05} = \frac{1}{R_{si} + R_5 + R_6 + R_{se}} = 0.70 \frac{W}{m^2K}$$

$$A_{e05} = U_{e05} \cdot S_{e05} = 11.41 \frac{W}{K}$$

Výsledný koeficient A_{e0} pre miestnosť 0 sa rovná súčtu týchto koeficientov.

$$A_{e0} = A_{e05} + A_{e04} + A_{e03} + A_{e02} + A_{e01} = 22.65 \frac{W}{K}$$

Po prevedení na jednotky $\frac{J}{K \cdot h}$ dostaneme výslednú hodnotu ktorú môžeme použiť v modeli.

$$A_{e0} = 81540 \frac{J}{K \cdot h}$$

Pri výpočte koeficientov A_{01} , A_{02} a A_{03} by sme postupovali takmer rovnako. Vnútorne steny sú tvorené jednou vrstvou pórobetónu s hrúbkou $d_0 = 250mm$ a tepelným odporom $R_0 = 2.16m^2 \cdot K/W$. Použité dvere majú hrúbku $d_1 = 40mm$ a súčiniteľ prestupu tepla $U_1 = 3.44 \frac{W}{m^2 K}$. Hodnoty pre jednotlivé miestnosti uvádzame v tabuľkách 5.2 a 5.1.

	Miestnosť 0	Miestnosť 1	Miestnosť 2	Miestnosť 3
Miestnosť 0	0	33172	27124	37393
Miestnosť 1	33172	0	9886	0
Miestnosť 2	27124	9886	0	15258
Miestnosť 3	37393	0	15258	0

Tabulka 5.1: Matica koeficientov A pre miestnosti v jednotkách J/h

Miestnosť 0	Miestnosť 1	Miestnosť 2	Miestnosť 3
81540	33520	69849	74661

Tabulka 5.2: Vektor koeficientov A pre miestnosti a vonkajšie prostredie v jednotkách J/h

5.5 Parametre ohrievačov

Na ohrievanie sme sa rozhodli použiť elektrické ohrievače, ktoré sú síce aktuálne nákladnejšie na prevádzku ale v budúcnosti dovoľujú použitie obnoviteľných zdrojov na rozdiel od ohrievačov, ktoré potrebujú fosílna palivá. Elektrické ohrievače majú vysokú účinnosť a majú výhodu v rýchlom nástupe, čo zodpovedá nášmu modelu, ktorý nástup nemodeluje.

Pre miestnosti číslo 0, 2 a 3 použijeme ohrievače s výkonom $P_0 = 1200W = 4320000J/h$. Pre miestnosť číslo 1 použijeme ohrievač s výkonom $P_1 = 600W = 2160000J/h$

5.6 Parametre testovaného modelu číslo 2

Rozmiestnenie miestností sa oproti Modelu 1 nezmenilo. V Modely 2 však chýba izolácia na obvodových stenách. Zmenené koeficienty A sú zapísané v tabuľke 5.3. Výkony ohrievačov sú zhodné s Modelom číslo 1.

Miestnosť 0	Miestnosť 1	Miestnosť 2	Miestnosť 3
85373	36439	73828	78154

Tabulka 5.3: Vektor koeficientov A pre miestnosti a vonkajšie prostredie v jednotkách J/h

5.7 Parametre testovaného Modelu číslo 3

Rozmiestnenie miestností a použité materiály zodpovedajú Modelu 1. Pre miestnosti 0, 2 a 3 použijeme ohrievače s výkonom $P_0 = 600W = 4320000J/h$. Pre miestnosť 0 použijeme ohrievač s výkonom $P_1 = 300W = 2160000J/h$

5.8 Testovanie spotreby energie na základe izolácie domu

Testovať budeme energiu spotrebovanú budovou na udržiavanie teploty počas celého roku. Na testovanie použijeme Model 1 a Model 2. Povolenú hladinu nekomfortu určíme na 500 hodín ročne. Nekomfort je čas, počas ktorého nebola dosiahnutá správna teplota v budove. Použijeme teploty z roku 2017.

Predpokladáme, že spotreba Modelu 2 bude vyššia ako spotreba Modelu 1. Je to spôsobené absenciou izolácie na obvodových stenách.

5.9 Výsledky testu

Pre Model 1 bol výsledný nekomfort $t_d = 363.406h = 363h24min21.6s$ a výsledná spotrebovaná energia $E = 2.4989 * 10^{10} J$.

Pre Model 2 bol výsledný nekomfort $t_d = 412.498h = 412h29min52.8s$ a výsledná spotrebovaná energia $E = 2.6287 * 10^{10} J$.

Modely sa správali podľa predpokladu a môžeme teda usúdiť, že zhoršenie teploizolačných vlastností spôsobí nárast spotrebovanej energie nárast hodín nekomfortu. Výsledky aj s približnými nákladmi sú v tabuľke 5.4. Z testu je zrejmé, že v nákladoch nie je markantný rozdiel a preto môžeme považovať izoláciu za nadbytočnú. Grafy s narastajúcou spotrebovanou energiou môžeme vidieť na obrázkoch 5.1 a 5.2.

	Model s izoláciou	Model bez izolácie
Spotreba energie [J]	$2.4989 * 10^{10}$	$2.6287 * 10^{10}$
Čas nekomfortu[h]	363.406	412.498
Približné ročné náklady [eur]	989	998

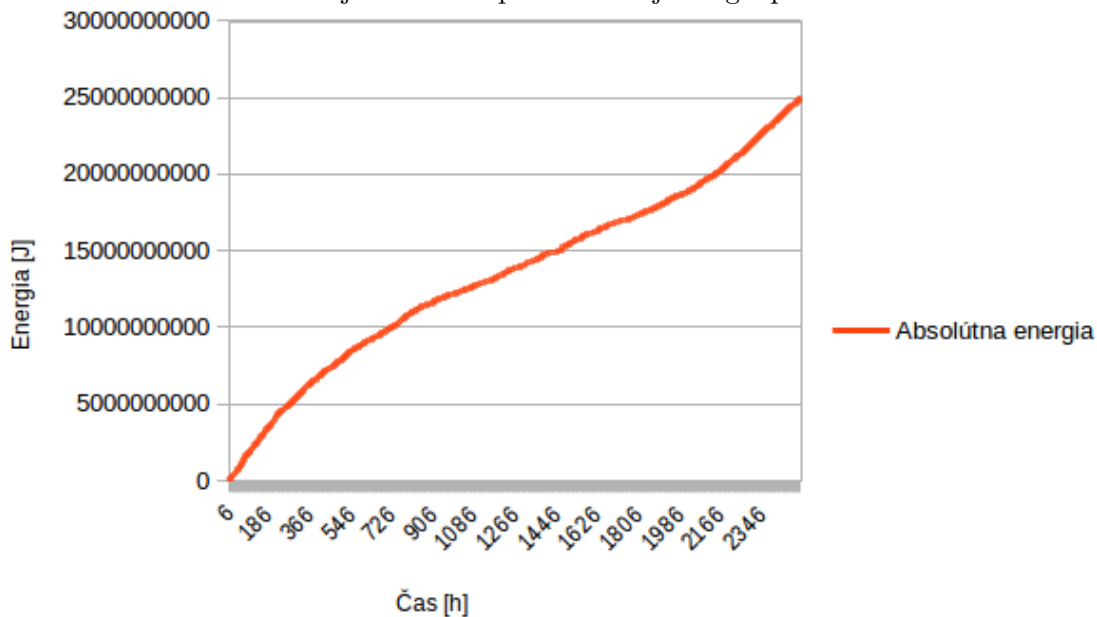
Tabuľka 5.4: Prehľad výsledkov testu spotreby energie na základe izolácie domu

5.10 Testovanie doby nekomfortu na základe výkonu ohrievača a klimatizačnej jednotky

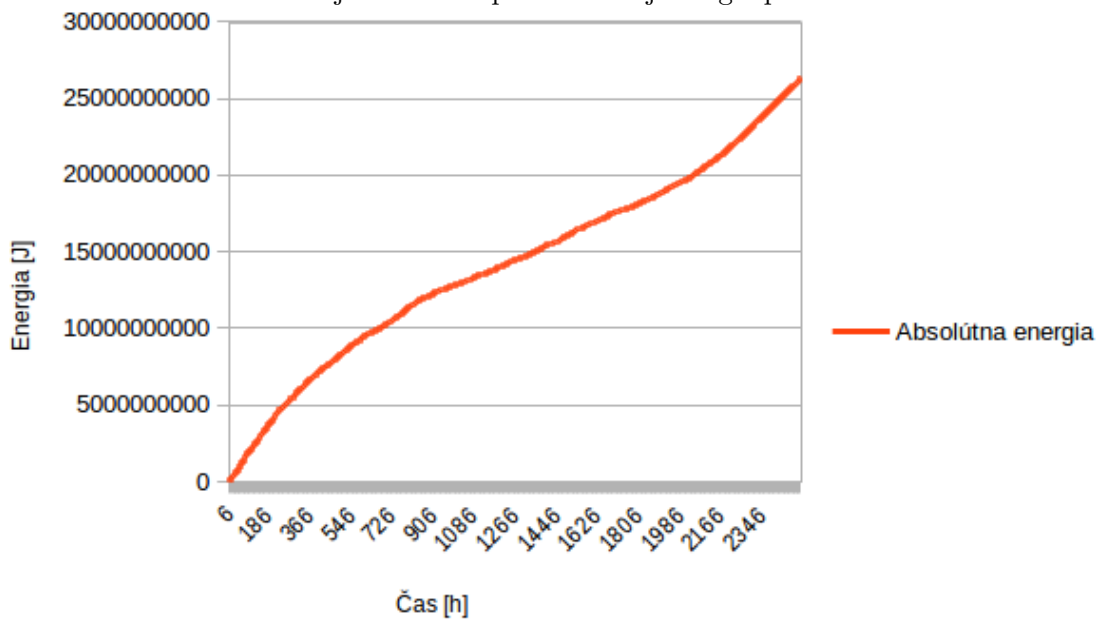
Budeme testovať Model číslo 1 a Model číslo 3. Model číslo 3 má výkon ohrievačov a klimatizačných jednotiek znížený na polovičnú hodnotu. Tentokrát použijeme celoročné teploty z roku 2016.

Pedpokladáme že, pre nízke výkony sa zdvihne čas nekomfortu. To ako rýchlo dokáže ohrievač alebo klimatizačná jednotka dodávať energiu, ovplyvní čas kedy teplota nebude vhodná.

Obrázek 5.1: Graf ukazujúci nárast spotrebovanej energie počas roka s izoláciou.



Obrázek 5.2: Graf ukazujúci nárast spotrebovanej energie počas roka bez izolácie.



5.11 Výsledok testu

Pri Modely číslo 3, s nižším výkonom, stúpala miera nekomfortu až na $t = 1406h$, zatiaľ čo pri Modely 1 to bolo len $t = 426h$. Spotrebovaná energia Modelu 3 dosiahla hodnotu $E = 2.40315 \cdot 10^{10} J$ a Modelu 1 $E = 2.48348 \cdot 10^{10} J$. Výsledky testu su zapísané aj v tabuľke. 5.5 Z výsledkov testu môžeme usúdiť, že s nižším výkonom ohrievačou síce klesne spotreba energie ale na úkor komfortu.

	Model s vyšším výkonom	Model s nižším výkonom
Spotreba energie [J]	$2.48348 \cdot 10^{10}$	$2.40315 \cdot 10^{10}$
Čas nekomfortu[h]	426	1406h
Približné ročné náklady [eur]	989	998

Tabulka 5.5: Prehľad výsledkov testu 2

5.12 Testovanie modelu pre ročné teploty

Pri tomto teste porovnáme priemerné teploty za roky 2014, 2016 a 2017. Priemerné teploty sú tvorené aritmetickým priemerom priemerných teplôt každého dňa roku.

Predpoklad je, že hodnoty priemerných teplôt pre jednotlivé roky budú porovnateľné.

5.13 Výsledok testu

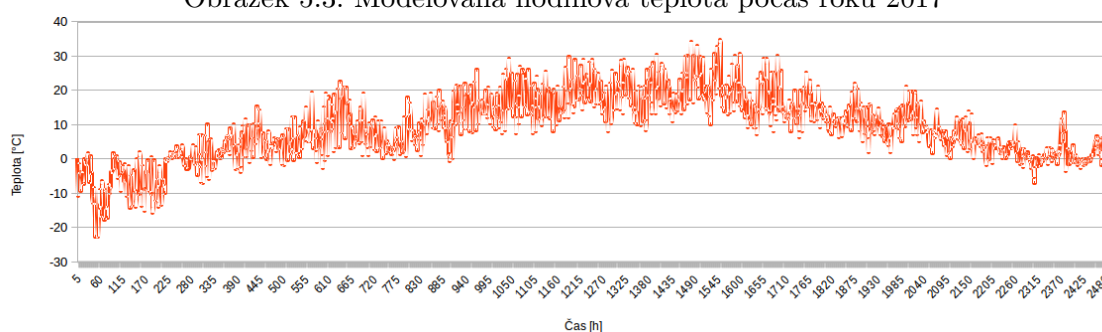
V tabuľke 5.6 sú uvedené reálne modelové priemerné ročné teploty.

Rok	Priemerná teplota [°C]	Modelová priemerná teplota [°C]
2014	10.60	10
2016	9.50	9
2017	9.50	9

Tabulka 5.6: Prehľad výsledkov testu modelu pre ročné teploty

Test ukazuje, že pre všetky tri roky sú priemerné teploty porovnateľné. Tento výsledok čiastočne znázorňuje presnosť modelu pre teploty počas dňa. Pre všetky tri roky je teplota vyššia čo môže byť spôsobené statickým maximum a minimum dennej teploty v modeli. V reálnom svete sa toto maximum a minimum pohybuje v rámci dňa. Na obrázku 5.3 je možné vidieť vývoj ročnej teploty v roku 2017 po hodinách.

Obrázek 5.3: Modelovaná hodinová teplota počas roku 2017



5.14 Testovanie modelu bez klimatizačných jednotiek

Porovnáme čas nekomfortu a spotrebovanú energiu Modelu číslo 2 s jeho variantou, kde bude chladiaci výkon klimatizačných jednotiek rovný nule. Takto nasimulujeme ich úplnú absenciu.

Predpokladáme, že celková spotrebovaná energia bez klimatizačných jednotiek bude nižšia, za cenu vysokého nekomfortu.

5.15 Výsledok testu

	Model s klimatizáciou	Model bez klimatizácie
Spotreba energie [J]	$2.3427 * 10^{10}$	$2.6287 * 10^{10}$
Čas nekomfortu[h]	1356.689h	412.498

Tabulka 5.7: Prehľad výsledkov testu modelu bez klimatizačných jednotiek

Spotreba modelu bez klimatizácie klesla a podľa predpokladu stúpol čas nekomfortu. Test číslo modelu bez klimatizačných jednotiek znova ukazuje, že je možné znížiť spotrebu za cenu zníženia komfortu.

Kapitola 6

Záver

Model energeticky úspornej budovy je nástroj, pomocou ktorého je možné otestovať rôzne konfigurácie materiálov a rozloženia s presnosťou ktorá zodpovedá návrhu. Je podľa neho napríklad možné orientačne vybrať vhodný tarif u dodávateľa energie. Takisto je možné zistiť výhodnosť investície do zateplenia.

Nezahrnutie všetkých faktorov spôsobuje nepresnosti, s ktorými je ale používateľ modelu oboznámený v návrhu. Otestovať model pokusom na reálnej budove nebolo možné a tak sa model spolieha na fyzikálne zákonitosti, na ktorých je založený. Vo všetkých testoch modelu sa potvrdili predpoklady.

Model je možné rozšíriť v mnohých smeroch a zvýšiť tak presnosť simulácie a výsledkov. Poloha maxima a minima teploty vzduchu počas dňa v rámci modelu určovania denných hodín má aktuálne fixnú pozíciu minima a maxima hodnoty teploty počas dňa. Existuje možnosť ho rozšíriť tak, aby sa táto poloha menila na základe východu a zapadu slnka. Model teploty počas dňa by viac zodpovedal realným teplotám.

Ohrievače v modeli by mohli byť rozšírené o akumuláciu, ďalšiu vrstvu, ktorá by predstavovala materiál, z ktorého je samotný ohrievač skonštruovaný. Teploty v miestnosti by boli presnejšie a dali by sa rozlíšiť aj ďalšie typy ohrievačov.

Ďalším faktorom je energia žiarenia zo Slnka. Táto vstupuje do budovy, najmä cez okná, a mení tým energiu vo vnútri miestností. Do modelu by sa mohla pridať vstupujúca energia ak by boli k dispozícii dáta o sile žiarenia slnka.

Ohrievače nesú jediný zdroj tepla. V miestnostiach sa nachádzajú aj iné zdroje tepla, väčšinou odpadového. Toto odpadové teplo tiež ovplyvňuje teplotu miestnosti a model by sa mohol o takúto funkčnosť rozšíriť.

Mnoho budov má zabudovaný obnoviteľný zdroj energie, napríklad fotovoltaické panely. Táto energia by mohla vstupovať do modelového systému a vyrovnávať spotrebovanú energiu. Pre takúto funkčnosť, by však bolo potrebné mať dáta o sile slnečného žiarenia.

Literatura

- [1] *Weather History for LZZI - January, 2017*. [Online; navštíveno 1.1.2018].
URL <https://www.wunderground.com/history/airport/LZZI>
- [2] *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů*. 2001, [Online; navštíveno 12.12.2017].
URL <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>
- [3] David Alexandre, L. K. G. M. M. S. A., Du DeHui: *An Evaluation Framework for Energy Aware Buildings using Statistical Model Checking*. Department of Computer Science, Aalborg University, [Online; navštíveno 24.10.2017].
URL <http://people.cs.aau.dk/~adavid/publications/70-china-smc.pdf>
- [4] Gerd Behrmann, a. K. G. L., Alexandre David: *A Tutorial on Uppaal, v. v. i.* Department of Computer Science, Aalborg University, Denmark, [Online; navštíveno 21.10.2017].
URL <http://people.cs.aau.dk/~adavid/publications/21-tutorial.pdf>
- [5] Lee, E. A.: *Cyber Physical Systems: Design Challenges*. IEEE, [Online; navštíveno 3.12.2017].
URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4519604/?part=1>
- [6] Svoboda, Z.: *Součinitel prostupu tepla*. FSv ČVUT.
- [7] Vysoudil, M.: *ZÁKLADY FYZICKÉ GEOGRAFIE 1 METEOROLOGIE A KLIMATOLOGIE*. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [8] WILIAM R. SCHAUB, J.: *A method for estimating missing hourly temperatures using daily maximum and minimum temperatures*. USAF Enviromental technical aplication center, Scott Air Force Base Illinois, [Online; navštíveno 7.3.2018].
URL <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a240394.pdf>